

BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco, Abel Alberto Cuadrado Vega
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Oviedo
Campus Universitario de Gijón, s/n.
{dperez, diegogarcia, cuadrado}@isa.uniovi.es, idiaz@uniovi.es

Resumen

Todas las estructuras están sometidas a diversos factores que afectan a su funcionamiento óptimo, incluso pueden provocar fallos en las mismas. La monitorización de la salud estructural consta de métodos que estudian el estado de una estructura, de manera que se identifique o localice un posible defecto mediante técnicas de análisis de vibraciones. Para explorar este campo de estudio es preciso tener una fuente de datos procedentes de un sistema real. Para ello, se propone diseñar un banco de ensayos en un laboratorio, el cual permita flexibilidad en su configuración, repetibilidad en los ensayos y fácil acceso a los datos medidos. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de banco de ensayos para la monitorización de salud estructural, formado por: una estructura metálica sencilla, un sistema de excitación de la estructura y herramientas de adquisición de las señales de vibración. Por último, se presenta un primer trabajo de análisis modal de las vibraciones basado en un análisis de componentes principales (principal component analysis, PCA).

Palabras clave: monitorización de salud estructural, métodos basados en vibración, análisis inteligente de datos

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de monitorización de salud estructural (*structural health monitoring*, SHM) son aquellos capaces de monitorizar el rendimiento de sistemas mecánicos (máquinas, aeronaves, grandes estructuras, etc.), detectando las desviaciones del sistema con respecto a un estado óptimo, generalmente el estado inicial. Estas desviaciones se denominan daños, los cuales pueden clasificarse en defectos, si únicamente afectan al rendimiento del sistema, o en fallos si estos defectos llevan al sistema a un estado en el que se comprometa su correcto funcionamiento, dejando de ser apto para el usuario.

Las técnicas SHM tienen como objetivo detectar tanto fallos como defectos en los sistemas mecáni-

cos aportando, además, información característica sobre ellos. Dentro de la literatura [17], una de las muchas formas de clasificar las técnicas SHM, es según la cantidad de información con la que caracterizan un defecto:

- Nivel 1: determinan la existencia de un defecto.
- Nivel 2: determinan la localización del defecto.
- Nivel 3: cuantifican la severidad del daño.
- Nivel 4: predicen el tiempo de vida del sistema.

A la hora de afrontar estos objetivos uno de los métodos más comunes en el estado del arte es el análisis de vibraciones del sistema, conocido como *vibration-based methods* [12]. Este tipo de técnicas se basan en el análisis modal de vibraciones medidas en el propio sistema monitorizado. El análisis de vibraciones es un método consolidado en la monitorización de defectos en máquinas rotatorias o *condition monitoring* (CM) como se denomina en la literatura [8, 9]. CM es un campo de estudio análogo a SHM, y por tanto es común hacer uso de técnicas similares basadas en vibraciones en ambos campos de estudio, pero se diferencian en que los datos de vibraciones recogidos de máquinas rotatorias suelen ser más invariantes a condiciones de entorno que las medidas procedentes de grandes estructuras, lo que dificulta en gran medida el análisis de salud estructural.

Profundizando en los métodos basados en análisis de vibraciones, el paradigma principal de este tipo de técnicas, tanto para CM como para SHM, es el *reconocimiento estadístico de patrones*, el cual según [13] se divide en cuatro tareas principales:

1. Evaluación operativa.
2. Adquisición de datos y su normalización.
3. Extracción de características.
4. Desarrollo de modelos.

Todos los ámbitos definidos por [13], salvo el primero, presentan una fuerte conexión con el análisis inteligente de datos (*intelligent data analysis*, IDA) aplicado a problemas de ingeniería, uno de los principales objetivos de las líneas de investigación activas en nuestro grupo [11, 10, 16]. Es, por tanto, una motivación iniciar una línea de investigación en este campo, ya que muchos de los conceptos de IDA adquiridos en trabajos anteriores son perfectamente transferibles al ámbito del SHM. Además, ciertas cuestiones abiertas de SHM, como conseguir una invariabilidad de los datos a las condiciones de entorno mediante una correcta extracción de características [15], pueden servir de motivación para la aplicación de técnicas novedosas de IDA como el *aprendizaje profundo* o *deep learning*, las cuales son objeto de interés en nuestra actividad investigadora.

Para iniciar una línea de estudio en SHM es claramente necesario un repositorio de datos de partida. En este punto se puede optar por repositorios públicos [6], o por la recogida de datos propios, los cuales pueden proceder de sistemas reales en funcionamiento, o de bancos de ensayo que simulen un sistema real. De las tres posibilidades planteadas, consideramos que la última opción parece la más adecuada para el inicio de una investigación en este campo, ya que un banco de ensayos modular permite simular problemas de estudio a medida, pudiendo regular escalonadamente la dificultad de los mismos. El objetivo de este artículo es mostrar el diseño de una bancada, que permita la recogida de medidas de vibraciones de una estructura simple para su posterior análisis modal.

En el apartado 2, se describirá el diseño propuesto y los detalles técnicos del banco de ensayos. En el apartado 3 se muestra un ejemplo de extracción de características y una proyección basada en el análisis de componentes principales (*principal component analysis*, PCA). Las limitaciones que presenta nuestro diseño y los aspectos a mejorar son expuestos en el apartado 4. Por último, en el apartado 5 se describen las conclusiones de nuestro diseño, así como las líneas de trabajo futuras.

2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS

2.1. ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura consta de una base, dos pilares (elementos verticales) y una viga que los une horizontalmente, formada por 3 barras unidas por medio de tornillos, tal como se aprecia en la figura 1.

El carácter modular de la estructura nos permi-

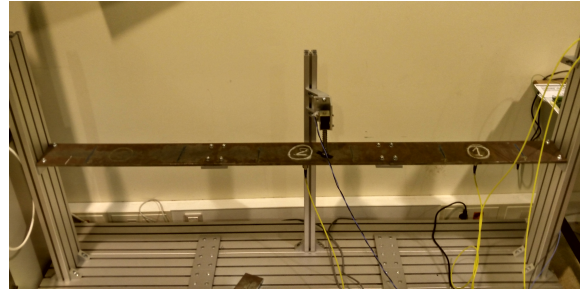


Figura 1: Imagen de la estructura. Se muestra la estructura propuesta, el actuador y los acelerómetros situados en las posiciones 1 (izquierda) y 2 (central) de la estructura.

te modificar su configuración fácilmente, con el fin de introducir perturbaciones de distinta índole al sistema, simulando situaciones anómalas características en los sistemas reales (desgastes en los anclajes, cambios anómalos en la distribución de las cargas, etc). Con esta configuración planteada se pretende imitar una estructura con viga de directriz recta, uno de los elementos estructurales básicos de los que se componen estructuras más complejas como estructuras formadas con vigas en celosía.

2.2. SISTEMA DE EXCITACIÓN

A la hora de desarrollar un sistema automático que determine la salud de una estructura, es necesario tener un módulo de adquisición de datos. Como se ha mencionado en la introducción, los métodos de adquisición más comunes son aquellos que están basados en el concepto de *vibration-based damage detection* [14]. Este tipo de sistemas engloban tres aspectos: 1) sistema de excitación, 2) tipo de sensores y 3) el número de sensores y su localización dentro de la estructura.

Este estudio se centra en el diseño del sistema de excitación ya que es el único aspecto de los mencionados que no depende del tipo de análisis a realizar en las etapas posteriores a la adquisición de datos [9]. En muchos de los sistemas basados en vibraciones no es necesario el uso de ningún excitador del sistema, sino que con la propia vibración natural del sistema es suficiente para extraer la información necesaria de su estado, pero en el caso concreto de bancadas que simulen a pequeña escala un sistema real es necesario el uso de una excitación externa, ya que carecen de vibración natural.

Una vez definida la necesidad de un sistema de excitación, para su diseño se debe satisfacer necesidades comunes en el desarrollo de metodologías de análisis de datos, como pueden ser una alta acce-

sibilidad a los datos, flexibilidad a la hora de cambiar su configuración y la repetibilidad de los ensayos. De acuerdo con estas funcionalidades mencionadas se propone un sistema de excitación formado por tres bloques: 1) percutor, 2) preaccionador y 3) controlador.



Figura 2: Imagen del actuador desmontado.

2.2.1. Percutor

El percutor, como se muestra en la figura 2, lo constituye una bobina de 24 V y 1A, la cual genera un campo magnético que atrae el eje metálico hacia su núcleo. En uno de los extremos del eje, se tiene una rosca con una tuerca que permiten sujetar un muelle. Cuando la bobina está energizada el muelle se encuentra contraído y cuando la corriente dentro de la bobina es cero, el muelle arrastra el eje hasta su posición de reposo, consiguiendo un movimiento lineal y golpeando la superficie de la bancada.

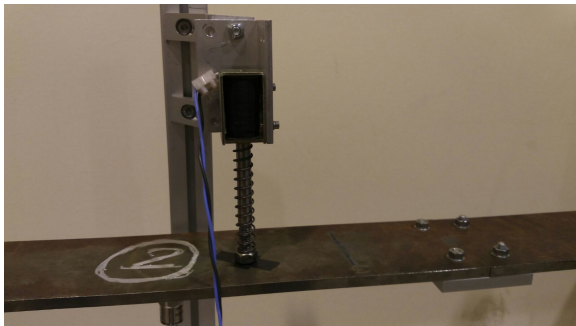


Figura 3: Imagen del actuador acoplado a la bancada.

En la figura 3 se pueden ver el percutor y el montaje que lo acopla a la bancada. Se puede apreciar como en la superficie de la estructura se recubre con un material aislante (de color negro) justo en la zona donde impacta el percutor. Esto es debido a que el campo magnético creado por la bobina es tan fuerte que es capaz de atraer la propia estructura hacia el núcleo de la bobina. Por ello, se debe interponer entre el eje y la estructura un medio no magnético.

2.2.2. Preaccionador

El preaccionador es el driver MD22 [3] mostrado en la figura 4, utilizado para el control de motores de corriente continua de media y baja potencia. Este driver alimentado con 24 V, está constituido por un puente en H capaz de regular el sentido y la intensidad de la corriente de salida llegando a valores máximos de 5A, por lo que es perfectamente apto para el control de activación de nuestra bobina.

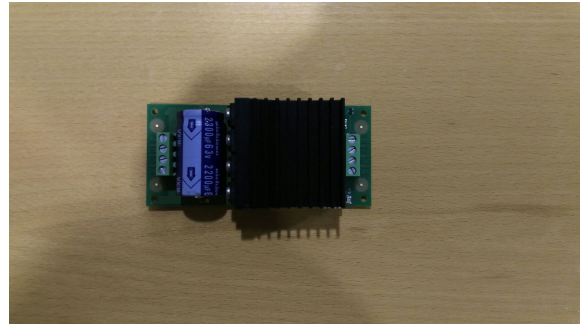


Figura 4: Driver MD22.

Este driver es capaz de regular la corriente que circula por la bobina del percutor, actuando como un relé que abre o cierra el circuito de alimentación de la bobina del percutor. En este caso, no interesa regular la corriente, por lo que se hace uso de su modo de funcionamiento como relé, o modo analógico. En este modo, con una señal de control de 0 V, se alimenta la bobina con +24 V, mientras que con una señal de control de 2,5 V, la bobina se desconecta.

En el momento que se inicia una recogida de datos, la bobina se activa contrayendo el muelle y elevando el eje. En este estado, el driver está alimentado en su entrada de control con 2,5V. A la hora de realizar un golpeo, se debe enviar al driver un pulso de 0V, por lo que la señal de golpeo es en lógica inversa.

2.2.3. Controlador

Las señales de control que rigen el comportamiento del driver, son enviadas por el controlador, en nuestro caso un *arduino mega 2560* [4]. Este modelo de arduino contiene un microcontrolador (AVR ATmega2560), el cual se puede programar mediante el IDE propietario de arduino.

El diseño del programa cargado en el controlador atiende principalmente a una de las funcionalidades de la bancada: la disponibilidad de los datos. De acuerdo con esta premisa se ha considerado que el banco de ensayos pueda ser manejado vía serie desde un ordenador desde el cual se puedan iniciar los ensayos y recoger los datos medidos por los sen-

sores. Por ello, el programa cargado en el microcontrolador tiene como cometido leer las órdenes enviadas por parte del PC vía serie, y actuar sobre la bancada acorde a estas consignas.

La comunicación serie en el PC, que en definitiva es la interfaz de manejo de la bancada para el usuario, debe ser manejada dentro de un entorno de desarrollo que soporte una comunicación serie (C++, Java, Python, etc). A la hora optar por uno de estos entornos se eligió Python [5], el cual es ampliamente reconocido en el ámbito de la ciencia de datos y que facilitará las etapas posteriores a la adquisición de datos dentro del paradigma de reconocimiento de patrones.

El programa alojado en arduino es muy sencillo: en ausencia de eventos por parte del bus serie el microcontrolador ha de suministrar al driver un nivel de tensión constante de 2,5V; cuando llega una orden “start” desde Python vía serie, el arduino envía un pulso de 0V de amplitud y 100 ms de duración al driver, produciendo un impacto en la bancada por parte del actuador.

Gracias a esta configuración del sistema de excitación es posible tener una alta flexibilidad a la hora de definir la excitación del ensayo, pudiendo generar ensayos con un único impacto, impactos a frecuencias determinadas o planificar una batería de ensayos en instantes específicos. Los resultados presentados en este artículo han sido obtenidos mediante señales procedentes de ensayos con un único impacto.

2.3. SENSORES Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS

La respuesta de la estructura a la entrada introducida por el sistema de excitación es recogida por dos acelerómetros, fijados sobre la parte inferior de la viga en las posiciones 1 y 2 de la estructura como muestra en la figura 1. Los acelerómetros se deben alimentar con el adaptador de señal, el cual además de alimentar los acelerómetros, acondiciona la señal para su posterior lectura por un osciloscopio. El osciloscopio que realiza esta medida es el modelo DPO2014B de *Tektronix* [7], el cual ha sido elegido por la posibilidad de conexión serie con un PC a través de Python. Esta conexión se gestiona bajo el estándar VISA [2], protocolo que nos permite la comunicación entre Python y el osciloscopio, gracias al módulo *pyVISA* [1]. Mediante el módulo *PyVISA* es posible recoger en un entorno Python las señales de los acelerómetros muestreadas a alta frecuencia (130 kHz).

Mediante un script se acciona el percutor, enviando la orden por el puerto serie, se capturan los

datos mediante el módulo *pyVISA* y se guardan en un fichero JSON, el cual almacena los ensayos realizados con distintas configuraciones de la bancada como datos de entrenamiento para futuros análisis. El nombre de este fichero se corresponde con la configuración de la bancada en el momento del ensayo y con el instante de tiempo que se inició el ensayo.

3. EXPERIMENTO Y RESULTADOS

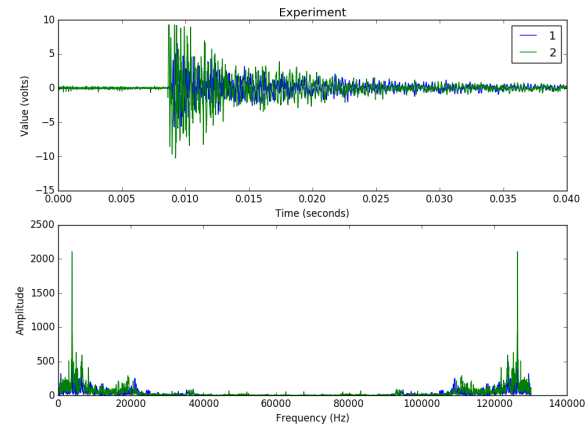


Figura 5: Evolución temporal de un ensayo (arriba) y su espectro (debajo).

Para probar la validez del diseño propuesto, se realizó un experimento preliminar en el que se puede ver reflejadas la mayoría de las características del paradigma de reconocimiento estadístico de patrones. Con este pequeño experimento se pretende acotar las ventajas y las limitaciones del diseño (estructura, sistema de excitación) y de la metodología empleada para la captura de los datos.

En la figura 5 se representa la adquisición de uno de los ensayos de entrenamiento en la que se pueden ver las señales de respuesta de los dos sensores en el momento del impacto (arriba) y la representación de su transformada de Fourier (debajo).

3.1. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Tras la captura de los datos de entrenamiento se procede a la extracción de características, mediante otro script, el cual lee los datos de entrenamiento capturados y realiza el procesamiento. Para ello, se extraen las características de las señales de vibraciones medidas por los acelerómetros en bandas de frecuencia determinadas, generando un vector de características, que contiene las energías en dichas bandas, para varios instantes de tiempo. Este vector, por tanto, describe la evolución

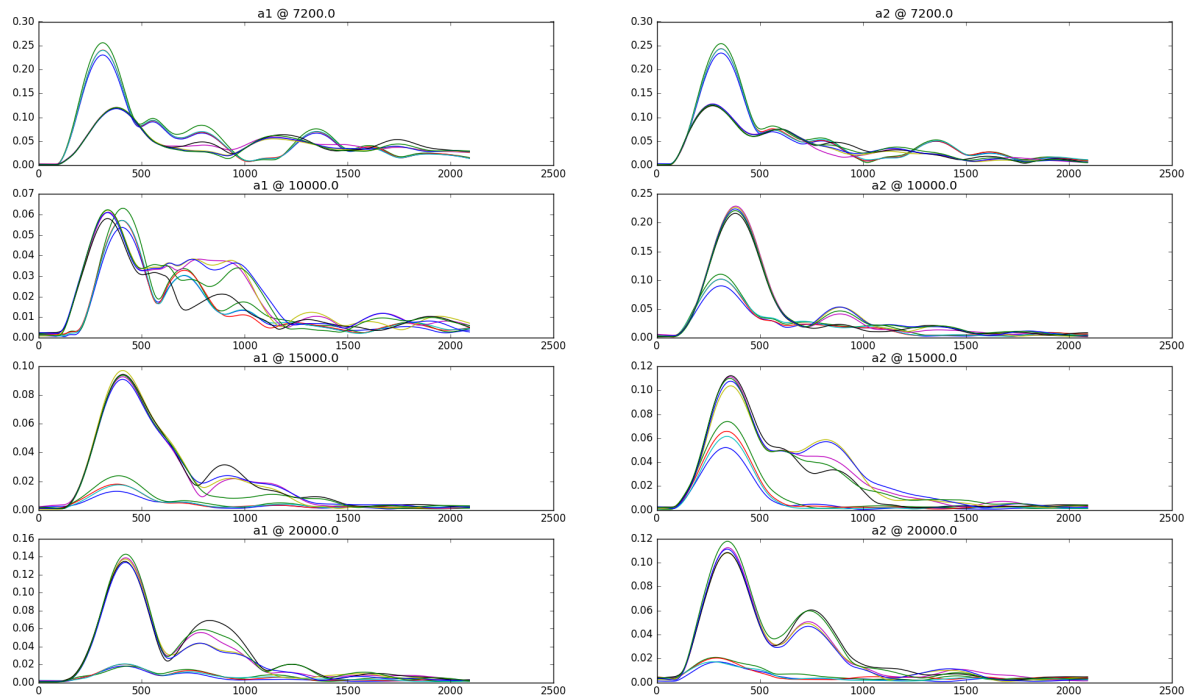


Figura 6: Evolución temporal de los armónicos de los dos sensores (en ambas columnas) a las frecuencias 7200, 10000, 15000, 20000 Hz.

temporal de los armónicos del sistema, constituyendo una expresión tiempo-frecuencia del estado dinámico de vibración, que contiene información detallada sobre su condición estructural.

Para el procesamiento de los datos se extraen las características de los acelerómetros en unas bandas de frecuencia determinadas. Los rangos de estas bandas de frecuencia son de 10 Hz y las frecuencias elegidas experimentalmente son de 7200, 10000, 15000, 20000 Hz. El tamaño de ventana elegida fue de 1024. Posteriormente se remuestra el resultado de manera que se obtienen 21 valores en cada frecuencia elegida para ambos acelerómetros. En la figura 6 se puede ver el procesado en estas frecuencias para las señales de los dos acelerómetros correspondientes a varios ensayos recogidos en la bancada. El color de las líneas se refiere a cada uno de los ensayos mostrados.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO: PROYECCIÓN PCA DE LOS ENSAYOS

Se propone como método de análisis una proyección de los datos en un plano, utilizando una de las técnicas de reducción de la dimensión más populares, el análisis de componentes principales (*prin-*

cipal component analysis, PCA), la cual encuentra combinaciones lineales ortogonales con mayor varianza en los datos. Para ello se hace un escalado previo de los datos para que los valores se encuentren dentro de unos rangos determinados.

Los datos, recogidos a modo de ejemplo, se dividen en un grupo de entrenamiento y otro grupo que simula nuevos ensayos de test. Los estados en la estructura recogidos en los datos capturados consisten en una situación normal, con todos los tornillos apretados, y otra situación con uno de los tornillos aflojado. Como se ha descrito en el anterior apartado, se extraen las características con 21 valores de 4 bandas de frecuencia para los 2 acelerómetros y se formatean en un único vector de manera que cada punto contiene un total de 168 valores. En la figura 7 se puede ver la proyección PCA resultante de un grupo de ensayos realizados de manera continuada. Se observa la separación clara de ambas situaciones de la estructura y que la proyección de los registros reservados para el test se sitúan en la zona del mapa correspondiente a la del estado de la estructura en el momento en el que se midieron.

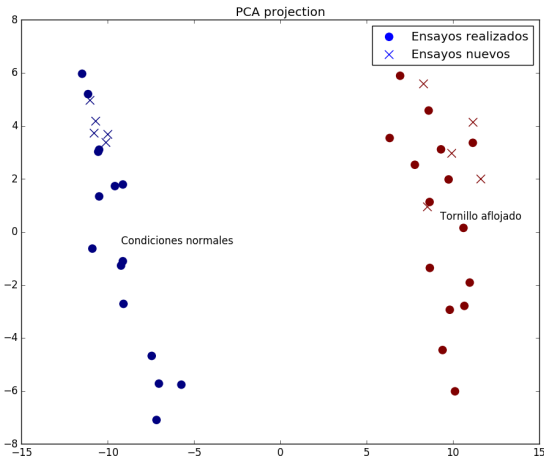


Figura 7: Proyección PCA. Círculos datos de entrenamiento, cruces datos de test. Color azul estado normal de la estructura y rojo estado de fallo (tornillo aflojado).

4. LIMITACIONES

A continuación se describen algunas limitaciones que se han identificado durante el desarrollo del sistema propuesto. La lógica inversa en el funcionamiento del percutor hace que la bobina se encuentre energizada en todo momento salvo en el momento de realizar un impacto, que es cuando se libera. Esto produce un calentamiento en el percutor que puede limitar su uso de manera continua y prolongada.

La variabilidad en los datos recogidos podría afectar a la repetibilidad de los ensayos en diferentes situaciones de la estructura. La adquisición se realiza tras una captura del osciloscopio que se dispara cuando una de las señales supera un umbral determinado. Para la realización de una adquisición continua de datos, se puede utilizar una tarjeta de adquisición cuyas salidas podrían incluso utilizarse para accionar el sistema de excitación, el cual podría constar de un dispositivo más avanzado utilizado por profesionales como los *shakers* electrodinámicos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la construcción de una bancada de ensayos para la monitorización de salud estructural. Esto permite la realización de diferentes experimentos por medio de una excitación de la estructura, la adquisición y el análisis de las señales de vibraciones en el dominio de la frecuencia y su visualización en un mapa 2D utilizando una técnica de reducción de la dimensión.

El montaje realizado incluye un sistema de excitación, accionado vía software, que provoca un impacto en la estructura, excitándola y recogiendo su respuesta modal mediante un osciloscopio conectado a un ordenador. El procesado de los datos consiste en la construcción de una matriz de datos cuyos atributos contienen las energías de la respuesta en determinadas bandas de frecuencia. Mediante un análisis de componentes principales se proyectan los puntos de ensayos en un mapa, en el cual pueden compararse con la proyección de otros puntos que definen diferentes ensayos de entrenamiento cubriendo diferentes situaciones de ejemplo que se pueden dar en la estructura.

Este montaje proporciona un excelente escenario en la adquisición de datos de ensayos reales para el estudio y validación de algoritmos aplicados en la monitorización de salud estructural. Como trabajo futuro quedarían tareas como tratar el calentamiento que se produce en el sistema de excitación, una organización modular del software que permita programar diferentes grupos de ensayos de manera automática o la estandarización de los datos recogidos añadiendo metadatos como el tipo de excitación, los defectos o fallos simulados. Otro aspecto que incrementaría el valor de nuestro banco de ensayos sería la implementación de un servicio remoto que permita al usuario realizar ensayos a través de una página web, aumentado de esta manera la flexibilidad y el acceso a los datos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) "Una manera de hacer Europa", bajo el proyecto de referencia DPI2015-69891-C2-2-R y por el Gobierno del Principado de Asturias a través del programa "Severo Ochoa" de ayudas predoctorales para la investigación y docencia del Principado de Asturias.

Referencias

- [1] Documentación pyvisa. <https://pyvisa.readthedocs.io/en/stable/>. Accessed: 2017-03-23.
- [2] Ivi foundation page. <http://www.ivifoundation.org/specifications/default.aspx>. Accessed: 2017-03-20.
- [3] Md22 datasheet. <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/md22tech.htm>. Accessed: 2017-02-09.

- [4] Página oficial arduino mega. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>. Accessed: 2017-06-09.
- [5] Página oficial python. <https://www.python.org/>. Accessed: 2017-03-23.
- [6] Shm data sets and software. <http://www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/engineering/software/shm-data-sets-and-software.php>. Accessed: 2017-06-07.
- [7] Tektronik dpo2014b. <http://www.tek.com/oscilloscope/mso2000-dpo2000>. Accessed: 2017-03-20.
- [8] D. E. Bently and T. Hatch'Charles. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. *Mechanical Engineering-CIME*, 125(12):53–54, 2003.
- [9] E. P. Carden and P. Fanning. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural health monitoring*, 3(4):355–377, 2004.
- [10] I. Díaz, A. A. Cuadrado, A. B. Díez, and M. Domínguez. Manifold learning for visualization of vibrational states of a rotating machine. In *ICANN (2)*, pages 285–292, 2011.
- [11] I. Díaz Blanco, M. Domínguez González, A. A. Cuadrado, and J. J. Fuertes Martínez. A new approach to exploratory analysis of system dynamics using som. applications to industrial processes. *Expert Systems With Applications*, 34(4):2953–2965, 2008.
- [12] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and others. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2):91–105, 1998.
- [13] C. R. Farrar, S. W. Doebling, and D. A. Nix. Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778):131–149, 2001.
- [14] C. R. Farrar and K. Worden. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):303–315, 2007.
- [15] Hoon Sohn. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):539–560, 2007.
- [16] D. Pérez, F. García-Fernández, I. Díaz, A. Cuadrado, D. Ordonez, A. Díez, and M. Domínguez. Visual analysis of a cold rolling process using a dimensionality reduction approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8):1865–1871, 2013.
- [17] A. Rytter. *Vibrational based inspection of civil engineering structures*. PhD thesis, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.